



Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino

**Appunti universitari**

**Tesi di laurea**

**Cartoleria e cancelleria**

**Stampa file e fotocopie**

**Print on demand**

**Rilegature**

NUMERO: 1276

ANNO: 2014

# A P P U N T I

STUDENTE: De Nicola

MATERIA: Materiali per l'Aerospazio + temi d'esame + Eserc.,  
Prof.Fino

Il presente lavoro nasce dall'impegno dell'autore ed è distribuito in accordo con il Centro Appunti.

Tutti i diritti sono riservati. È vietata qualsiasi riproduzione, copia totale o parziale, dei contenuti inseriti nel presente volume, ivi inclusa la memorizzazione, rielaborazione, diffusione o distribuzione dei contenuti stessi mediante qualunque supporto magnetico o cartaceo, piattaforma tecnologica o rete telematica, senza previa autorizzazione scritta dell'autore.

**ATTENZIONE: QUESTI APPUNTI SONO FATTI DA STUDENTIE NON SONO STATI VISIONATI DAL DOCENTE.  
IL NOME DEL PROFESSORE, SERVE SOLO PER IDENTIFICARE IL CORSO.**

SUPERLEGHE base NICKEL  
COBALTO  
NICKEL FERRO

## II INDICE DEGLI ARGOMENTI

ALLIGANTI

MECC. DI RAFFORZAMENTO (sol. solido, precipitazione, carboni, boroni)

FASI INDESIDERATE ( $\sigma$ ,  $\mu$ , LAVES)

UTILIZZO A T elevate / non elevate

TIPDI DI SOLIDIFICAZIONE (unidiriz, monocristallo, policristallo ODS)

PRODUZIONE def. plates (ingot, powder)

colata (poli xx, single xx, dirizionale)

VIM, ESR, VAR, HIP, AFUMIZZAZIONE

Suprleghe ODS

RENIO

WOLFR

INFRA GILIMENTO DA IDROGENO

INTERMETALLICI NiAl

Ni<sub>3</sub>Al

TiAl  $\rightarrow$   $\gamma$ , Ti<sub>3</sub>Al  $\rightarrow$   $\alpha_2$

$\rightarrow$  generazioni  
 $\rightarrow$  Nb, D, Ni, PL

PRODUZIONE additive manufacturing EBM, SLS, SLM, LENS, LMA

ACCIAI tipologie (inox, austenite, alto/medio/basso - legat, High/Med/Low-carbon)

rafforzamento (sol. solido, 2<sup>a</sup> fase, affinamento grani, inclusions)

fenomeni della ossidazione

Alliganti: C, N, P, Si,  $\gamma$  e  $\alpha$  stabilizzanti

Carboni, Ossid, Solfuri

Trochim. Termici (Ricottura completa, Normalizzazione, Bonifica)

Trochim. Superficiali (A cementazione, induzione, cementazione, nitrazione, carbonitrurazione)

Pelletrazione, Rullatura, Celdmatura, Cromatura

(A)

# Compositi

fibre naturali

di Carbonio

di Borio (produzione, coatings)

di Vetro (E, AR, M, S, E-CR)

di Alluminio

di Carbonio di riciclo (CVD, PIRUSI)

# ABBINAMENTI

matrice/ rinforzo

Confronto delle caratteristiche

## MMC

produzione con matrice → PUSA coating, infiltrazione (UNXIDE)  
inf. con premessa, sottovuoto

→ SOLIDA prep. e fuso e sint  
prep. e caldo

→ IN SITU DIMOX (gas-ly)

INFILTRAZ. RELATIVA (ly.-solid)

→ PER DEPOSIZIONE spray

PVD, CVD

elettrodeposizione

co-deposizione

## PMC

produzione

HAND LAY-UP

SPRAY LAY-UP

RTM

PRE-PREG

POLTRUSIONE

SACCO-VUOTO-AUTOCLAVE

FILAMENT WINDING

CALDO SOTTO PRESSIONE / SOTTO VUOTO

STAMPAGGIO A CALDO ed A FREDDO SOTTO PRESSIONE

Termoindurenti polietere, EP, PI, Fenolice,

Termoplastici PC, PEEK, PPS

COMPOSITI IBRIDI → ARALL, ~~GR~~ GLASS, SANDWICH

Dimensionamento del TBC

Tipi di TBC → EB-PVD

→ APS (APS, VPS, ZPS, RPS, HPS)

Crescita del TGO

Doppio meccanismo diffusivo

Sistema APS → problema in intermedia → crescita TGO e corrosione

Simulazioni

## REQUISITI SUPERLEGHE:

- \* ALTA RESISTENZA
- \* BUONA RESISTENZA A FATICA
- \* BUONA RESISTENZA A CREEP
- \* BUONA TENACITÀ A FRATTURA
- \* BUONA RESISTENZA A CORROSIONE/OSSIDAZIONE

ANCHE AD  
ALTE T !!

## Parametro di resistenza allo shock termico

$$TSR \cong \frac{\sigma \cdot k \cdot (1 - \nu)}{E \cdot \alpha}$$

$\sigma$  = resistenza

$k$  = conducibilità termica

$\nu$  = coeff. di poisson

$\alpha$  = coeff. esp. termica

$$\Delta T_{\text{max}} = TSR \cdot f$$

$f$  = fattore geometrico

## STRUTTURA SUPERLEGHE

Le superleghe di Ni-Fe e Co hanno una struttura cristallina FCC a T ambiente.

↳ l'elevato numero di sistemi di scorrimento caratteristici del reticolo FCC determina la buona duttilità delle superleghe.

SUPERLEGHE DI NICKEL: 50 ÷ 70% in peso di Ni; 10 ÷ 25% in peso di Cr; 0 ÷ 10% in peso di Al, Ti e Nb; 0 ÷ 20% in peso di Co e piccole quantità di Mo, W, Ta, B, Zn, C ed altri elementi.

SUPERLEGHE DI NICKEL-FERRO: 10 ÷ 50% in peso di Ni; 15 ÷ 60 in peso di Fe; 15 ÷ 28% di Cr in peso di Cr; 0 ÷ 10% in peso di Al, Ti e Nb; 0 ÷ 20% in peso di Co e piccole quantità di B, Zn, C ed altri elementi.

SUPERLEGHE DI COBALTO: 10 ÷ 35% in peso di Ni; 30 ÷ 60% in peso di Co; 20 ÷ 30% Cr; 0 ÷ 5% in peso di Al e Ti e piccole quantità di Mo, W, Ta, B, Zn, C ed altri elementi.

una distorsione all'interfaccia, è indicata come MISFIT.

La COERENZA TRA LE 2 FASI e il MISFIT possono portare a STATI DI TENSIONE ELASTICA ALL'INTERFACCIA CHE OSTACOLANO IL MOVIMENTO DELLE DISLOCAZIONI.

L'efficacia dei precipitati indurenti dipende quindi dall'entità del misfit, dalle dimensioni e dalla forma.

**RAFFORZAMENTO PER FORMAZIONE DI CARBURI:** I carburi possono precipitare lungo i bordi di grano oppure all'interno dei grani. La formazione di certi carburi può coinvolgere alcuni elementi leganti sottratti alla matrice austenitica. I carburi più frequentemente osservati appartengono alle classi  $MC$ ,  $M_{23}C_6$  e  $M_6C$  (1)

• RIVEDERE!! 03 SUPERLEGHE 1 pag 16 e seguenti.

**NB:** Il C è sovente aggiunto in piccole quantità alle superleghe con la funzione di rafforzare il materiale ma non è presente quando si vuole ottenere migliore resistenza alla corrosione. La presenza di carburi predispone il materiale alla CORROSIONE INTERGRANULARE.

**BORURI:** Il boro è in grado di STABILIZZARE IL BORDO DI GRANO occupando le vacanze reticolari  $\Rightarrow$  BLOCCA I FENOMENI DIFFUSIVI DI ALTRI ELEMENTI EVITANDO LA PRECIPITAZIONE DI FASI INFRAGILIANTI AL BORDO DI GRANO. I boruri possono anche bloccare la nucleazione delle cricche ( $H_3B_2$ , devoto durato, tetragonale)

**FASI INDESIDERATE (TCP  $\rightarrow$  topologically close packing)**

↓  
COMPOSTI INTERMETALLICI AD ELEVATO NUMERO DI COORDINAZIONE (3 FAMIGLIE)

FASI  $\sigma$

FASI  $\mu$

FASI DI LAVES

\* FASI  $\sigma$ : intermetallica del tipo  $A_x B_y$ , con  $x, y = 1 \div 7$ . La formazione di fasi  $\sigma$  è favorita nelle leghe a maggior contenuto di Cr e Mo. (placchette allungate, ai BGA)

\* FASI  $\mu$ : intermetallica del tipo  $A_7 B_6$

\* FASI DI LAVES: formula generale  $A_2 B$ . Nel caso delle superleghe onnumera composizione complessa. (EC, CFC)

↓  
Tutte queste fasi **INFLUENZANO NEGATIVAMENTE** le caratteristiche meccaniche delle superleghe: La fase  $\sigma$  si presenta a bordo grano creando con il suo interno concentrazioni di sforzi e nucleazioni di cricche. Le fasi di Laves presentano un effetto infragilente. Infine, poiché i metalli pesanti si concentrano in tutte queste fasi, la loro formazione comporta un impoverimento in metalli pesanti dell'austenite  $\Rightarrow$  minore durezza.

## 02 - SUPERLEGHE 2

La **COMPOSIZIONE** e la **MICROSTRUTURA** delle superleghe dipendono dall'impiego a cui è destinata.

→ \* **SUPERLEGHE CHE OPERANO A T NON PARTICOLARMENTE ELEVATE**

Struttura poli cristallina  $\rightarrow$  garantire caratteristiche meccaniche a freddo migliori.

Il controllo del creep può essere affidato alla precipitazione di carboni e boruri, oltre che all'aggiunta di stabilizzanti di bordo grano (Zr, Hf)

→ \* **SUPERLEGHE CHE OPERANO A T PIÙ ELEVATE**  $\Rightarrow$  PARTICOLARE ATTENZIONE AI FENOMENI DI CREEP.

Altra ~~di~~ ai sistemi per la stabilizzazione del bordo di grano e alla realizzazione di materiali con grani cristallini di



## VII7 Vacuum Induction melting

↓ Sorti di lavorazione più elementi singoli (per correggere la composizione) vengono posti all'interno di un crogiolo e portati a fusione. Il crogiolo è circondato da spire che generano un campo magnetico, il quale provoca il mescolamento del materiale fuso. Successivamente si cola in lingottiere.

- \* Si ottiene la composizione voluta
- \* Si cerca di minimizzare le contaminazioni lavorando in vuoto
- \* Occorre poi un remelting (ESR o VAR): lingotti con microstruttura grossolana e non omogenea che avrebbero scarsa lavorabilità e disomogeneità anche chimica.

## ESR Electronslag Remelting

- ↓ Viene fornita corrente alternata ad un circuito costituito da:
- LINGOTTO DI SUPERLEGA DA RIFONDERE (che si consuma progressivamente)
  - SLAG o SCORIA (principalmente  $CaF_2$ ) → basse densità e alta resistenza elettrica
  - IL LINGOTTO DI SUPERLEGA SOLIDIFICATA dopo la rifusione (che si accresce progressivamente)

L'elevata resistenza elettrica della scoria fa salire la  $T_{el}$  di sopra della  $T_{di}$  di fusione del lingotto da rifondere, che fonde dove è in contatto con la scoria. Si formano goccioline di superlega fuse che attraversano la scoria poiché hanno densità maggiore e solidificano nella lingottiera sottostante. Attraversando la scoria la superlega si affina poiché si eliminano ad esempio S ed inclusioni non metalliche (O, N, ...)

Non occorre il vuoto: è la scoria che sigilla l'ambiente.

NB: Di solito le superleghe che hanno maggior quantità di oliganti sono prodotte per PM piuttosto che per IT (per rendere meno probabile segregazioni e cricche)

ATOMIZZAZIONE: Metodo + utilizzato per la produzione di polveri metalliche. Consiste nella dispersione di una lega liquida della lega con un forte getto di gas inerte, che riduce il liquido in goccioline più o meno sferiche le quali solidificano e cadono sul fondo, dove vengono raccolte. È importante dimensionare correttamente l'atomizzatore per ottenere particelle il più possibile sferiche. Se le gocce impattano prima di solidificare perderanno la forma sferica.

I trattamenti termici per ottenere la microstruttura finale (rapporto  $\gamma/\gamma'$ , morfologia del  $\gamma'$ , carburi, etc) e stress relieving vengono effettuati sul COMPONENTE FINALE

NON È POSSIBILE PRODURLE PER CASTING

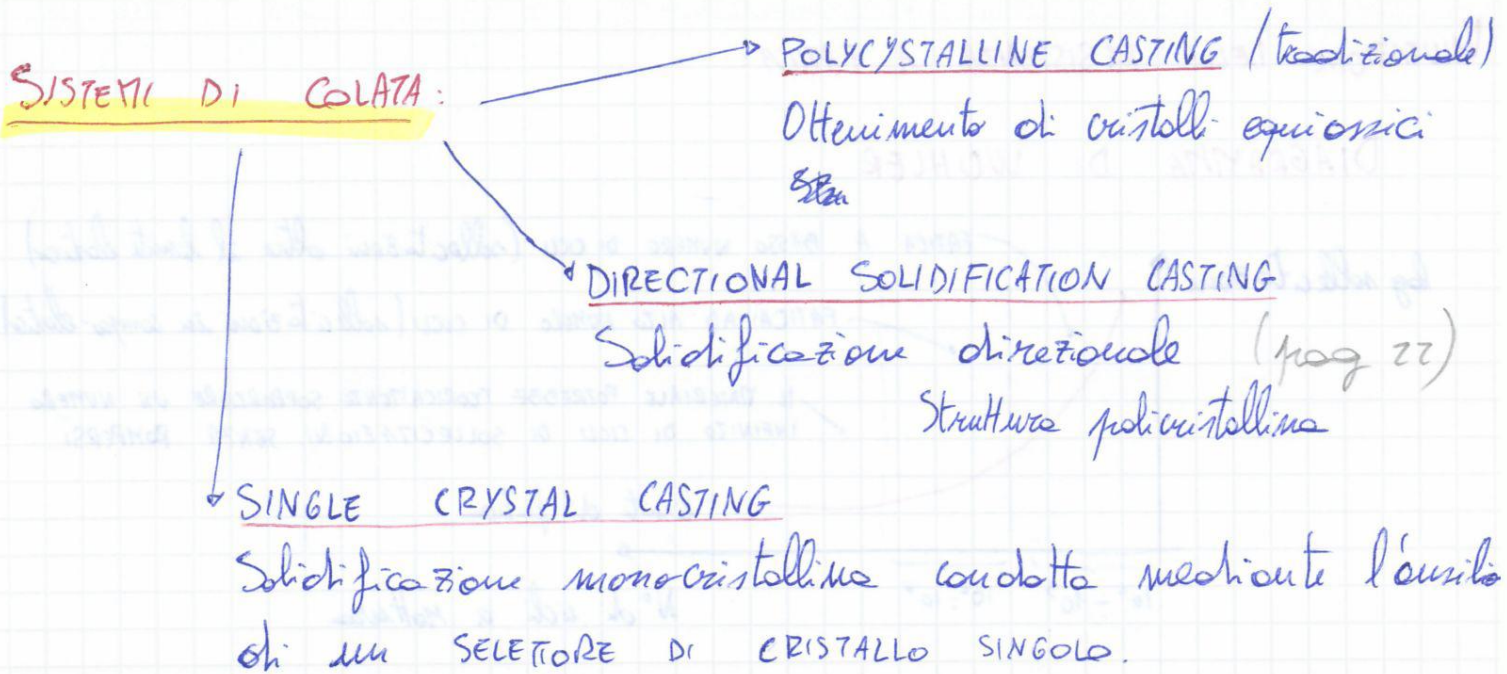
SUPERLEGHE ODS: Vengono usate solo tecniche MP modificate per poter (leghe rafforzate per dispersione di ossidi) inserire le polveri di ossido. (NON SI USA IL CASTING)

Sono policristalline e rafforzate per la presenza di ossidi di ferro e delle fase  $\gamma'$ .

Affinché le caratteristiche meccaniche siano omogenee l'ossido deve essere disperso in modo uniforme nella matrice metallica.

La tecnica normalmente adottata per garantire la massima omogeneità è detta ALLIGAZIONE MECCANICA (Mechanical Alloying (MA))

Il processo produttivo delle superleghe ODS si articola nei seguenti stadi:



IMPORTANTE: elemento strategico

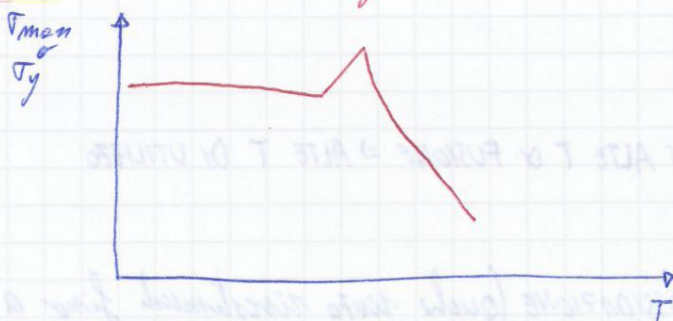
Il RENIUM, sebbene molto costoso, svolge la funzione di rallentatore la crescita dei precipitati di  $\gamma'$  a caldo. Si evita in questo modo di cambiare il meccanismo di interazione tra  $\gamma'$  e le dislocazioni: se i precipitati cresceranno eccessivamente le dislocazioni li aggireranno, ma invece di attraversarli.

Superalleghe di Nichel: MONOCRISTALLINE

1 <sup>a</sup>	generazione	→	0% Cr	↑	Cr	↓	Re	, 0% B
2 <sup>a</sup>	"	→	"	↑		↓	"	"
3 <sup>a</sup>	"	→	"	↑		↓	"	"

La resistenza al creep delle leghe ODS fino a 1000°C è inferiore rispetto a quella delle superleghe<sup>(DS)</sup> ottenute per solidificazione direzionale, ma diventa progressivamente migliore al di sopra dei 1000°C. AD ALTE T LE ODS COMPETONO CON LE LEGHE SINGLE CRYSTAL

NB: Alcune superleghe possono presentare una variazione non monotona di  $\sigma_{max}$  e  $\sigma_y$  all'aumentare della T



- Svantaggi:**
- \* BASSA DUTILITÀ A T AMBIENTE
  - \* SCARSA TENACITÀ A FRATTURA
  - \* ELEVATA VELOCITÀ DI PROPAGAZIONE DELLA FRATTURA A FATICA

## NiAl

La riduzione di densità rispetto alle superleghe di Ni è del 30%.  
 La conducibilità termica " " " " " è di 3-8 volte + grande

- \* SCARSA RESISTENZA ALL'IMPATTO
- \* SCARSA TOLLERANZA AI DIFETTI

## TECNOLOGIE PRODUTTIVE COMPONENTI NiAl, Ni<sub>3</sub>Al: (CCC) (CFC)

- Deformazione plastica a caldo
- Metallurgia delle polveri
- Fusione in stampo
- Solidificazione direzionale
- Solidificazione monocristallina

## GAMMA INTERMETALLICI TiAl

Sostituti alle superleghe per le palette di alcuni stadi delle turbine di bassa pressione dei motori aeronautici.

(RIDUZIONE DI PESO DEI COMPONENTI DEL ~30%)

- \* BASSA DENSITÀ (4 g/cm<sup>3</sup> vs. 8 g/cm<sup>3</sup> delle superleghe base Ni)
- \* RESISTENZA SPECIFICA PARAGONABILE A QUELLA DELLE SUPERLEGHE DI Ni
- \* BUONA RESISTENZA ALL'OSSIDAZIONE E ALLA CORROSIONE FINO A 700°C

Impiegate negli ultimi stadi delle turbine di bassa pressione

Gamma TiAl → Leghe di prima generazione (tipi Ti-47Al, Ti-48Al)

↓  
 Leghe di seconda generazione: sono stati introdotti: Cr (migliore duttilità), Nb e Ta (migliorano la resistenza all'ossidazione) con % alliganti < 5%

→ MICROSTRUTURA FL → Peggior tenacità, resistenza al creep, mantenimento delle proprietà meccaniche ad alte T

→ MICROSTRUTURA D. → Compromesso tra NG e FL: buone duttilità e resistenza a trazione a scoppio di tenacità e resistenza al creep.

In generale l'allungamento <sup>a rottura?</sup> a T ambiente può essere compreso tra 0,3 e 4%, lo  $\sigma_y$  tra i 250 e 600 MPa e  $\sigma_f$  tra 300 e 700 MPa.

La microstruttura desiderata è ottenibile mediante trattamenti termici.

Il Nb migliora la resistenza all'ossidazione.

### TECNOLOGIE PRODUTTIVE DEGLI INTERMETALLICI Ti-AL

$\left. \begin{array}{l} \rightarrow \text{VIM} + \text{investment CASTING} \\ \rightarrow \text{VIM} + \text{VAR} + \text{VAR} + \text{IM} \\ \rightarrow \text{VIM} + \text{VAR} + \text{ATOMIZATION} + \text{PM} \end{array} \right\}$  Sono tecnologie delle superleghe.

↳ Norme molto stringente di evitare contaminazioni con O, N ed H.

# ACCIAI

10% del peso dell'acciaio

Sollecitazioni  
- statiche (trazione, compress., flessione, torsione)  
- dinamiche (impatti)  
- monotone o cicliche del carico (fatica)  
- di superficie (usura, ossidazione, corrosione)

~~INOX~~ INOX → CROMIO % > 10-12% in peso

↳ BASSO CARBONIO [stabilizzazione] [Alte % di Cr e C]

↓  
formazione di carburi di cromo, il carbonio consuma il Cr  
risparmio dello stesso per evitare oltre il 12% di Cr

Soluzione: POCO C, AGGIUNTO Ti/Nb/Ta (che formano  
carburi di  
più del cromo)  
[oppure IMPIEGHI A  $T < 370^\circ\text{C}$ ]

Influenza degli elementi leganti → rafforzamento per

- \* 1 - Soluzione Solida (sostituzionale interstiziale)
- \* 2 - Precipitazione di 2<sup>e</sup> fasi
- \* 3 - Affinamento del grano
- 4 - Incrudimento (def. plastic)

RAFFORZAMENTO PER SOLUZIONE SOLIDA

1) C, N, P, Si → ottimi per rafforzam. per soluz. solida

MA peggiorano la tenacità e frattura e aumentano la

temp. di transizione fragile/dutile (cum. campo di fragilità)

Elementi che stabilizzano la fase  $\delta$  (Ni, Mn, Co, Cu, Zn, C, N)

↳  $\alpha$  (Cr, V, Mo, W, Al, Ti)

RAFFORZ. PER PRECIPITAZIONE DI SECONDE FASI

2) Elementi con affinità chimica → formano precipitati ai BdG

Se i precipitati sono DURI, ne aumentano durezza, resistenza, resistenza a snervamento della lega

CARBURI → CEMENTITE  $\text{Fe}_3\text{C}$  (e altri:  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6, \dots$ )

OSSIDI →  $\text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{MnO}$  (infragili)

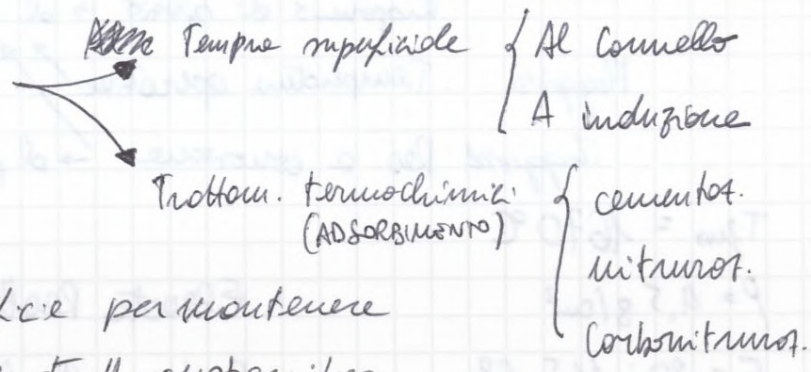
SOLFURI →  $\text{MnS}$  (infragili)

Temperabilità → massimo livello di indurimento superficiale  
 → massima profondità di tempra

Prove JOMINI

\* Parte del C si allontano dal reticolo della martensite, precipitano carboni FINI e ~~SFERICI~~ GLOBULARI, ⊖ FRAGILITÀ dell'acciaio

Troottamenti di Indurimento Superficiale



Si opera una tempra di superficie per mantenere il cuore del pezzo con microstrutt. austenitica

- ⊕ durezza ~~del~~ in superficie
- ⊕ Res. a fatica (trasp. martensite → ⊕ Volume → Superficie in compressione)

Cementazione → Solida ~~del~~

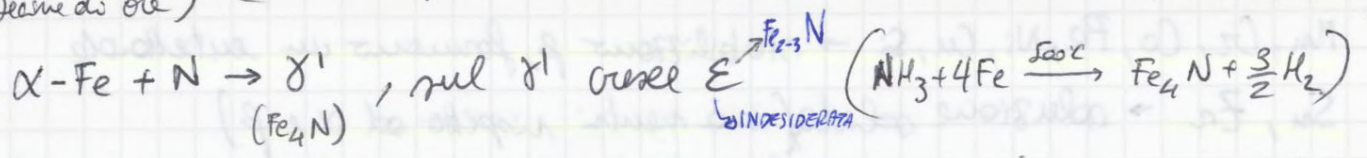
(870 ÷ 930 °C)  
(1 ÷ 10 h)

• KILLUMTRI

File de austenitizzazione → prima cemento, poi tempra

Nitrosazione → soluz. solida con azoto adsorbito →  $Fe_4N$

(500 °C) (Decine di ore) (non bisogna cuocere al  $Fe_{2-3}N$  → FRAGILE) (si ha anche una riduzione dell'otturto su acciaio)



(de temp. non parte ad austenitizzazione → prima tempra, poi nitrosazione)

• Decimi di millimetro, durezza maggiore

PALLINATURA (shot-peening) con sfere di acciaio, e getto d'acqua, laser

def. plastiche → sforzi residui di compressione → ⊕ res. a fatica

Titonio commercialmente puro (CP)  $\rightarrow$  grado X (= tenore di impurezze)

(Al)  $\rightarrow$  oltre al 4% pes  $\rightarrow$  forma  $\alpha_2$  ( $Ti_3Al$ ), coerente con il  $\alpha$ -TiAl  
 $\hookrightarrow$  precipitato rafforzante

## LEGHE $\alpha$ e NEAR- $\alpha$ (reticolo EC)

Buona saldabilità

Per uso ad alte temperature (EC)

Resistenze @  $T_{amb}$   $\rightarrow$  simili agli acciai (ma minor densità! ~40%)

$\hookrightarrow$  minori di leghe  $\alpha+\beta$  e  $\beta$

Non si miscelano e rafforzano con trattamenti termici

Struttura EC  $\rightarrow$  duttilità legata all'orientazione  $\rightarrow$   $\oplus$  res. e deformat. ad alte temp.  
 $\rightarrow$  res. e creep

Modifica le prop. mecc. con lavorazioni a freddo ed invecchiamento

$\hookrightarrow$  taglia dei grani  $\rightarrow$  fini  $\rightarrow$   $\oplus$  res. mecc.  
 $\oplus$  res. fatica

Difficoltà in lavorazione

$\hookrightarrow$  grani  $\rightarrow$   $\oplus$  ten. e fratture

## LEGHE $\beta$ (reticolo CCC)

Non saldabili / Saldabilità limitata

@  $T$  non elevato  $\rightarrow$  componenti fortemente sollecitati ( $\rightarrow$  res: KOLLÉ)

Rafforzam. per T.T.

Menù duttile di acciai (ma migliori prop. mecc.)

reticolo CCC  $\rightarrow$   $\ominus$  res. ad alta temperatura

Ottima formabilità

Solubilizzazione ed invecchiamento

• Senza invecchiamento: buona duttilità e tenocità, basse res. rotture e fatica

• con invecchiamento: precipitati  $\alpha$ , fini per basse  $T$  aigua (prevale nucleazione)  
 $\rightarrow$   $\oplus$  res. mecc., LUNGI TEMPI, BASSE  $T$  ( $< 500^\circ C$ )

Modifica prop. mecc. con lavorat. a freddo, invecchiamento

$\hookrightarrow$  taglia del grano



# Deformazione Superplastica (SPF, superplastic forming)

@ Specifica temperatura (~~per le deformazioni~~)

per lente velocità di deformazione  $\rightarrow$  def. plastica  $\epsilon = 100 \div 2000\%$   
(senza danneggiamenti.)

NO RICOTTURA  $\left\{ \begin{array}{l} \text{NO INCRUDIMENTO} \\ \text{T ALTA, C'È GIÀ} \end{array} \right.$

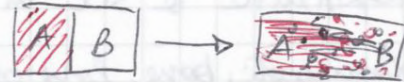
Microstruttura equiasica fine ( $< 10 \mu\text{m}$ )

T elevate  $\dot{\epsilon}_{10} > 10^3 \text{ s}^{-1}$   $\Rightarrow$  Sensibile scorrimento viscoso

$d\epsilon/dt \approx 10^{-3} \div 10^{-5} \text{ s}^{-1} \rightarrow$  sistemi pneumatici / pressioni gassose

## Diffusion Bonding (DB)

Tecnica di saldatura per diffusione, sfrutta la diff. dello stato solido senza portare le sup. da saldare vicine alla fusione oppure senza appioppare un terzo materiale d'appoggio come fondente



STEPS:

- 1- Contatto tra le sup, pressione
- 2- Colla e crescita per diffusione
- 3- Legame

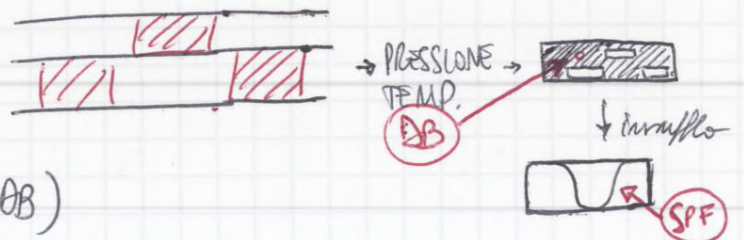
Spesso si accoppiano DB e SPF  $\rightarrow$  produzione di strutture allepente



2 parti portanti (SKINS) intervallate da lamina ripiegata (SPF-DB)

3 lastre + distributori  
(che decompressano)  
(ad alte T)

(dove  $\alpha^+$  ha SPF e non DB)



Porta @  $T_{SPF}$ , insufflo gas inerte, la lamina di mezzo si deforma

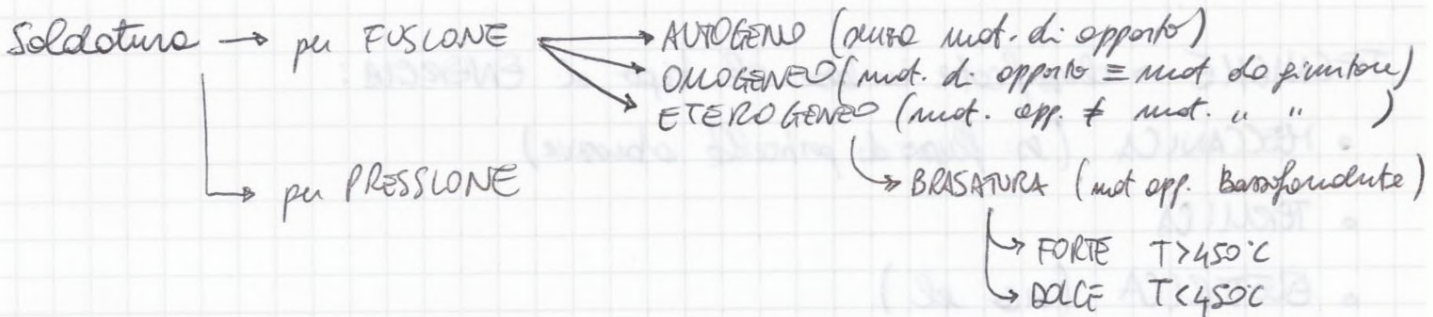
~~deforma~~ ~~contatto~~ ~~DB~~

# 15. SALDATURE NON CONVENZIONALI

(WELDING)

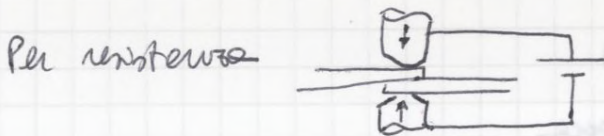
Fattori influenzanti la saldabilità:

- film superficiali di ossido passivanti (repassing,  $Al_2O_3$  per leghe Al)
- conducibilità termica ( $\oplus$  cond. termica  $\rightarrow \oplus$  dissipazione calore)
  - (serve una elevata velocità di somministrazione del calore)
- coeff. esp. termica (problemi nel controllo dimensionale)
- intervallo di fusione (problemi nel controllo del processo)
- conducibilità elettrica ( $\oplus$  cond. el  $\rightarrow \ominus$  res. elettrica  $\rightarrow \ominus$  riscaldamento più effetto Joule)
  - (saldatura più resistente)



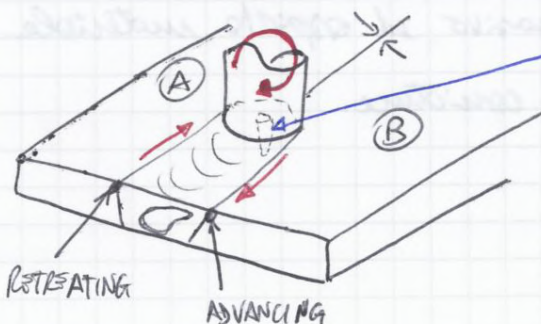
- Per Fusione
- A GAS (flamma ossidrica, ossiacetilica)
  - LASER (LBW)
  - FASCIO ELETTRICO (EBW)
  - DE PLASMA (PAW)
  - ARCO ELETTRICO (GMAW & MIG, TIG & GTAW)

(zone fuse, zone termicam. alterate (ZTA), zone a bassa temp)



Per attrito (FSW, friction stir welding), anche per leghe diff. c.l. da saldare più facilmente (2xxx e 7xxx, Al)

$\rightarrow$  giunzione alle stato solido metallo non fuso, ma PLASTICIZZATO



PERNO che affonda nel materiale plasticizzato, lo sposta e lo mescola, formando la giunzione

▷ Fresatura elettrochimica (ECM, electro-chemical machining)

PEZZO → ANODO

UTENSILE → CATODO

ELETTROLITA pu asportare il materiale → liquido flussato

→ PROCESSO INVERSO DELLA PLACCATURA GALVANICA

~~Corrente~~ Corrente elettrica ELEVATA, ma a BASSA TENSIONE (non arco elettrico)

- mat. elettricamente conduttivi (SOLO PER)
- non risente della durezza del mat.
- FORME COMPLICATE

▷ Elettroerosione (EDM)

• solo per mat. elettricam. conduttivi

• non risente di durezza (resistenza termica)

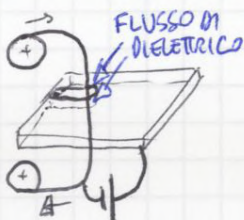
• Utensile (~~catodo~~) tuffato in fluido dielettrico (acqua distillata), parte arco elettrico, fusione dello mp. del pezzo (localizzato), fluido flussato che asporta le gocce fuse

• tensione elevata (50 ÷ 380 V), corrente continua pulsata (ricarica di condensatori)

(che influenzano ad in processi con el. meccanica)

Taglio a filo

▷ TAGLIO A FILO (EDWC)



filo in ottone, rame, Mo, W / rivestito in Zn o stene

filo utilizzato UNA VATA, ELETTRODO sempre prestazionale (elettroerosione a filo) (EDWC)

▷ Fresatura Chimica (CHM)



→ anche pezzi grandi (VASCHE da 4x15m)

steno, indurite, topolite e minime, rimozione delle zone da etchare

Maschere in neoprene, PVC, PE, PP, elastomeri, polimeri → 25 ÷ 125 μm

Bagno chimico in base al mat. da fresare e alla vel. di asportazione, alle maschere

→ NaOH pu Al, HCl pu acciaio, HNO<sub>3</sub> pu acciaio, FeCl<sub>3</sub> pu INOX

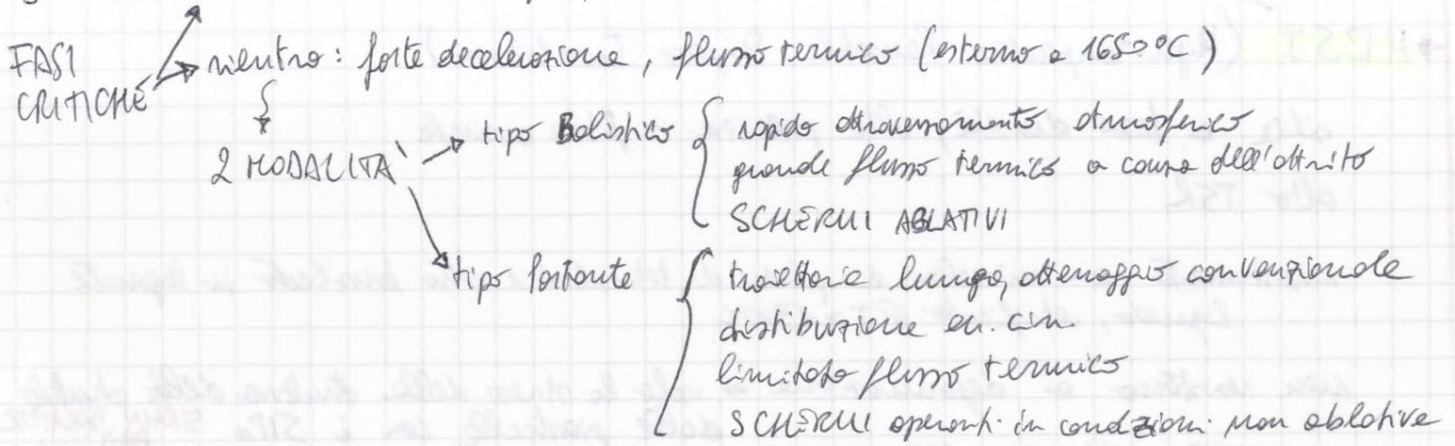
# TPS

thermal protection system

SPAZZO → ambiente aggressivo:

- vuoto spinto → emissione di gas dal materiale
- ossigeno atomico
- polveri ioniche → collisioni
- enormi  $\Delta T$
- radiazioni (UV, ion,  $\alpha$ )

SHUTTLE decollo: 28'000 Km/h, in 46' ve in orbita



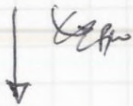
TPS RIUTILIZZABILI

mat. composti ceramici

refrattari ( $T > 1800^\circ\text{C}$ )

DURATA: 100 MISSIONI

USO:  $-121^\circ\text{C} \rightarrow +1650^\circ\text{C}$



- 2 tipologie di elementi costitutivi → BLANKET (mantello) con CTE simile alla struttura portante, non servono mat. intermedi per compensare le differenti espansioni

TILES (piastrella)

coating a base P, base cond. term.

fibre di  $\text{SiO}_2$  o  $\text{Al}_2\text{O}_3$

impedimento struttura

- **RCC** (Reinforced Carbon-Carbon)

Per zone con  $T > 1260^\circ\text{C}$  (Naso, profilo anteriore delle ali)

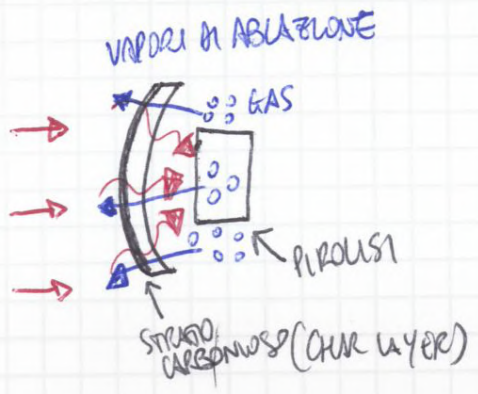
Produzione dei TPS → da fase solida o da fase liquida

Caratteristiche richieste ai TPS di uno shuttle:

- ridotte perdite aerodinamiche
- adesione alle strutture in Al
- basso peso

polimero, monomero, polimerizzazione  
 omopolimero, copolimeri  
 termoplastici, termindurenti.

**ABLATIVI** → l'ablazione inizia quando la **cond.** termica raggiunge una temperatura ~~eg~~ pari alla **T<sub>ABLAZIONE</sub>** della matrice polimerica



POLIMERO SOLIDO → LIQUIDO  
 LIQUIDO → GAS

SECCO TERMICO → PIROLISI del POLIMERO → GAS

Il GAS pulisce attraverso le porosità superficiali e trasferisce il calore dall'interno allo strato più esterno

PIROLISI → promuovere la formazione in sup. di un rivestimento carbonioso con **ALTA EMISSIVITA'**, che **REIRRADIA** nello strato limite il calore radiativo che altrimenti penetrerebbe nel materiale

Composito polimerico con **FIBRE** → che mantengono aderenti lo strato di CHAR se hanno **T<sub>comp</sub> → ALTE** → rimangono intatte

↳ **BASSE** → fusione/vaporizzazione → otti porosi per il passaggio del gas di ablazione

Classificazione degli ablativi <sup>IN BASE A</sup>

- criticità ambiente di rientro (flussi termici)
- presenza di stagnazione
- frazione di massa
- conchi termici totali

**Ablativi per BASSE flussi termici** → @ **T<sub>BASSE</sub>** → Modifica dello strato sup.

compositi a matrice polimerica + fibre corte o pericelle  
**RESINE** → (FENOLICA, SILICONICA, EPOXY)

Resine Fenoliche → meccanismo di ablazione

- 1) resina → furolo o crosslo come prodotto della reazione (400°C)
- 2) amidi e lg. etero → emissione di H<sub>2</sub>O (600°C)
- 3) il H<sub>2</sub> è il prodotto dominante (700°C)

SLA - 561 struttura fundera + silice

↓  
@ T<sub>ALTA</sub> → silice residuo inorganico di SILICE

Boniere di temp. di MASSA

## PRODUZIONE

1° metodo: struttura primario portante nella quale è depositato un film collante e poi ricoperto <sup>DA COMPOSIT</sup> ~~di~~ di resina fundera + fibre di vetro curing in sacco-vuoto-autoclave

2° metodo: struttura primario portante, depositato per spruzzatura, curing

Ablotivi per flussi termici INTERMEDI ( $250 \div 1.100 \text{ W/cm}^2$ )

resina fundera + fibre di C

Se il flusso termico non immerge le fibre, l'alta cond. termica del mat. può danneggiarle!

Ablotivi per flussi termici ELEVATI ( $> 1.100 \text{ W/cm}^2$ )

minor grado di ablazione, tempi più lunghi di impiego

↳ prodotti a temperature maggiori

compositi C/C a bassa densità (fibre di C o GRAFITE intrecciate + matrice C)

↳  $1,4 \div 2 \text{ g/cm}^3$

↳ alta res. mecc.

↳ alto TSR

Ablotivi LCA (Lightweight Ceramic Ablators) (PICA, SIRCA)

• molto leggeri: ~~con~~ con prop. termiche e ablotive SUPERBILI

• ablazione tradizionale + bassa densità degli RSI

PICA →  $0,2 \text{ g/cm}^3$ , fibre C come substrato (FIBERFORM) impregnato di resina fundera

SIRCA → " , fibre di  $\text{SiO}_2$ , substrato FRICI

# I VETRI

liquidi sovraraffreddati, non in grado di cristallizzare, emente viscosità fino a diventare un MURFO, un vetro

MURFO → immediatamente metastabile (tende a tornare cristallino)  
 ↳ al riscaldamento prima si ha ramollimento, poi fusione, perché i legami non si rompono tutti alla stessa temperatura (NO T<sub>FUS</sub>, NO L.R.O.)

Silice fusa → in base alla  $\vec{V}_{RAFFR}$  → MONOCRISTALLO  
 ↳ POLICRISTALLO  
 ↳ MURFO ( $\vec{V}_{RAFFR}$  alta, almeno  $10^4$  c/sec)

(long range order)

Tetraedri di silice ed ossigeno (vetri comune) disposti con un certo ordine e CARO RAGGIO (SRO)

In particolare per avere un vetro si deve soddisfare

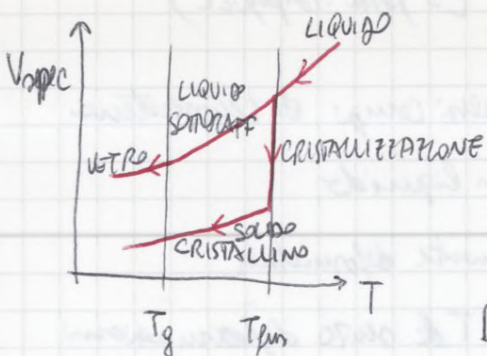
$$\vec{V}_{RAFFR} > \vec{V}_{CRISTALLIZZAZIONE}$$

I liquidi vetrogeni (buoni formatori di vetri anche a  $\vec{V}_{RAFFR}$  non elevate) hanno elevata VISCOSITA' nell'intervallo della T<sub>FUS</sub> (SiO<sub>2</sub> fuso a 1720°C →  $\eta = 10^6$  Pa·s)

Cerame → ossidi inorganici, fluoruri inorg., ossidi di tellurio

Metalli → vetri metallici per  $\vec{V}_{RAFFR}$  elevate

Polimeri → PET, Plexiglass



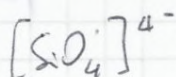
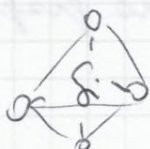
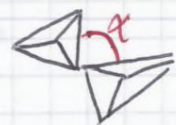
$$Volume\ Specific = \frac{VOLUME}{MASSA} = \rho^{-1}$$

In un vetro si ha @  $T_g$  (temp. di transizione vetrosa) una variazione della pendenza delle curve del  $V_{spec}$

DSC →

SILICE cristallina → tetraedri legati secondo geometrie precise

amorfo → tetraedri legati con angoli più semplicemente variabili



MODULO ELASTICO  $\approx 70$  GPa

rottura fragile  $\rightarrow$  GRIFFITH  $\rightarrow$  pori e difetti come concentratori degli sforzi

(MAT. DUTILES  
 $\downarrow$   
ARROTONDA gli spigoli delle cricche  
e diminuisce la  $\sigma_{effettiva}$ )

All'opre della cricca si ha  $\sigma_{EFFECTIVA} > \sigma_{NOMINALE}$   
 $\sigma_m > \sigma_0$

$$\sigma_m = \sigma_0 \left[ 1 + 2\sqrt{\frac{a}{\rho_t}} \right]$$

$$\sigma_m = 2\sigma_0 \sqrt{\frac{a}{\rho_t}}$$

$\rho_t$  = raggio di curvatura della cricca

$a$  = semilunghezza orre di una cricca ellittica

Fattore di concentrazione degli sforzi  $K_I = \frac{\sigma_m}{\sigma_0} = 2\sqrt{\frac{a}{\rho_t}}$

$\rightarrow$  misura il grado di amplificazione dello sforzo all'opre delle cricche

durante la propagazione delle cricche, il materiale ~~CEDE~~ assorbe energia di deformazione elastica ed ASSORBE energia per creare le superfici delle cricche

CRITICA DI PROPAGAZIONE DEL DIFETTO  $\Rightarrow \sigma_c = \sqrt{\frac{2E\gamma_s}{\pi a}}$

$E$  = modulo

$\gamma_s$  = en. sup. specifica

$a$  = sezione cricca

Da cui ricavare

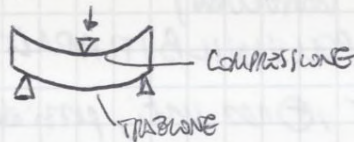
$$K = Y \sigma \sqrt{p \cdot e} = [MPa \cdot \sqrt{m}]$$

E poi

$$K_{Ic} = Y \sigma_c \sqrt{p \cdot e} \rightarrow \text{funzione a frattura in condizioni di def. p. one}$$

Prove di Flessione  
(3,4 punti)

per mat. fragili  $\rightarrow$  le cricche non influenzano



$$\sigma_{f0} = \frac{3F_0 L}{2bd^2}$$

VETRI  $\rightarrow \sigma_{RE} = 1000$  MPa ~~(PROVA A COMPRESSIONE)~~

• coefficiente di sicurezza  $C_s = \frac{\sigma_{permissibile}}{\sigma_{propria}}$

• dispersione strutturale  $\rightarrow$  compositi fibrosi di forma BREVE  $\rightarrow$  cattivi conduttori di calore

• buona densità  $\rightarrow$  buona potere FONDISOLANTE

• rottura per contrasto (o tensione localizzata)

$$\sigma = \frac{\epsilon \times \Delta T}{2(1-\delta)} = [N/mm^2] \quad \delta = \text{POISSON} = 0,22$$

(MA COMunque MIGLIORATA  
DI LEGNO o CEMENTO,  
SI DEVE AUMENTARE QUINDI  
L'ISOLAMENTO TERMICO)



Vetri di sicurezza (armati, temprati, stratificati) res. urti, isolam. termico e acustico



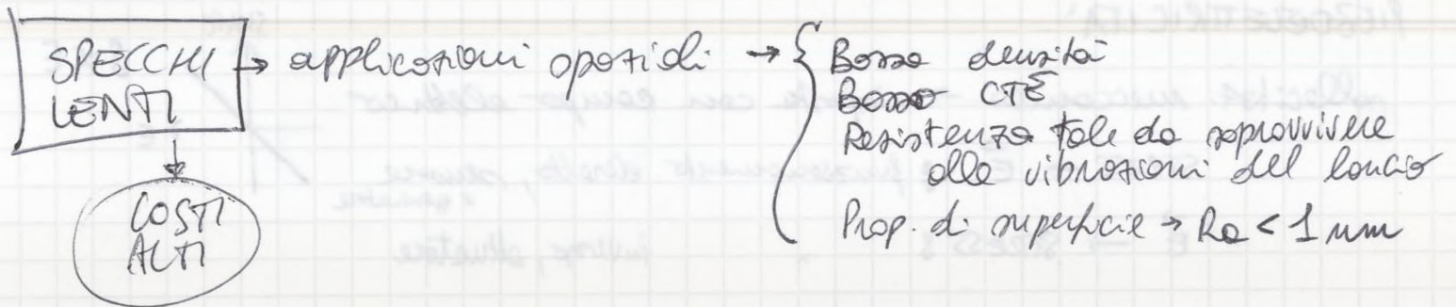
FIBRE DI VETRO

- lunghe → rinforzo mat. polimerica
- corte → isolamento termico/acustico

FIBRE OTICHE conducono segnali luminosi

VETRO CERAMICI mat. parzialmente amorfi e part. cristalline  
contengono partic. cristall. disperse in matrice vetrosa

NANOTECNOLOGIE → nanoceramici → ⊕ prop. meca.

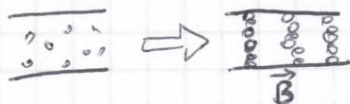


Scattering della luce da parte delle nanoparticelle

MAGNETOSTRIZIONE  $\vec{B} \rightarrow$  variazione di forma  
(mot. ferromagnetic)

FLUIDI MAGNETOREOLOGICI (MR FLUID)

$\vec{B} \rightarrow$  cambia la VISCOSITA'  $\rightarrow$  fino e diventa quasi un solido vincolandosi



**SMART 2**

$T_c =$  temp. di CURIE  
 $\hookrightarrow$  da quella una transizione di fase nella strutt. cristallina determina la PERDITA delle proprietà piezoelettriche

Materiali Piezoelettrici naturali:  $SiO_2$  (quarzo), perovskiti,  $ZnO$

- Dopo POLARIZZAZIONE
- Piezoceramici:  $BaTiO_3$ , PZT (POLICRISTALLINI)
  - Piezocompositi: POLIMERO + PIEZOCERAMICO
  - Piezopolimeri: PVDF,  $TaFE$ ,  $TeFE$

COME POLARIZZARE? **PIROELETTRICITA'**  $\rightarrow$  compenso di carica al riscaldamento

**FERROELETTRICITA'**  $\rightarrow$  cristallo che orienta il dipolo nel senso del campo applicato

$\hookrightarrow$  elevato campo elettrico  $\rightarrow$  formazione di domini

[ il mot. netto polarizzato SE  $\vec{E} \rightarrow$  ]  
 piezoelettrici anche senza  $\vec{E}$

**PEROVSKITI**  $T > T_c \rightarrow$  CUBICA

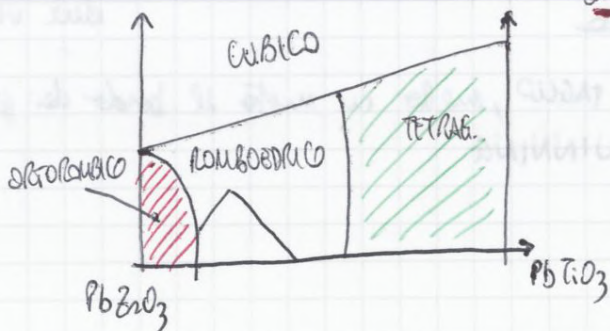
$T < T_c \rightarrow$  TETRAGONALE, ROMBOEDRICA  $\rightarrow$  polarizzazione

Campo elettrico  $\rightarrow$  Rotazione dei domini

- forte  $\vec{E}$ , basse temp.  $3KV/mm$ ,  $T = 120^\circ C$
- debole  $\vec{E}$ , alta temp.  $40V/mm$ ,  $T = 380^\circ C$

non tutti i domini si orienteranno in modo uguale

**PZT** soluzione solida di  $PbZrO_3$  e  $PbTiO_3$   
ORTOROMBO TETRAGONALE



$T_c > 300^\circ C$

@  $T > T_c \rightarrow$  cubico, simmetrico

@  $T < T_c \rightarrow$  struttura distorta, di polo



Applicazione: riduzione del rumore in motori per aerei → **VARIABLE GEOMETRY CHEVRON**

- ① AUSTENITE, raffreddata a MARTENSITE ②
- ③, ④ MARTENSITE DEFORMATA
- ⑤ trans al austenite con ↑T, verso a MARTENSITE al raffreddamento

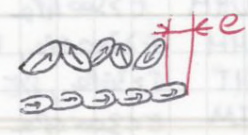
MAGNETOSTRUTTORE Terfenol-D, Magnetoreolofe, leghe magn. & mem. di forma

Domini magnetici interni → ELLITTICI

Compo magnetico → ROTAZIONE DEI DOMINI → SFORZO, ELONGAZIONE

→ ANISOTROPO!

→ tempo reazione → MICROSECONDI!



Terfenol-D  $T > T_c \rightarrow$  cubico, paramagnetico

$T < T_c \rightarrow$  cubico, ferromagnetico

@  $T_{amb} \rightarrow$  metastabile, diventa tetragonale

Il confine di fase e' il Terfenol-D

→ motori lineari, attuatori elettromeccanici

di Vetro

E più utilizzato / E-CR corrosion resistant

(per matrici  
polimeriche)

AR alkali resistant, con  $ZrO_2$ , rinforzo di microsfere in cemento

M modulo elevato,  $E = 110 \text{ GPa}$

S strong,  $\sigma = 4,5 \text{ GPa}$

(da filatura del vetro fuso)

di Alluminio ( $Al_2O_3$ )

$T_{fus} \approx 2000^\circ C$

(NEXTEL)

(per matrici ceramiche  
e metalliche)

TUSO fino a  $1800^\circ C$

(SAPHELON)  
(SAFFIL)

Produzione estrusione da slurry o da gel viscoso e sinterizzazione

(sospensione di  
particelle ceramiche)

(precursori delle  
fibre)

di Carburo di Silicio (SiC)

(SCS  
TYRANNO  
NICALON)

$T_{fus} = 2830^\circ C$

Toxide =  $1100^\circ C$  (OSSIDAZ.  
PASSIVA)

(per matrici  
ceramiche e  
metalliche)

$T > 1200^\circ C \rightarrow SiO \text{ gassoso} + O_2(g) \rightarrow$  (OSSIDAZ.  
ATTIVA)

PRODUZIONE

CVD  $\Rightarrow CH_3SiCl_3(g) \rightarrow SiC + 3HCl(g)$

su filamento in W o C

$d = 150 \mu m$

PIROLISI da precursori organici:

fibre di pol. carbonileno  $\rightarrow 1300^\circ C$  IN VUOTO  $\rightarrow$  fibre di SiC

$d = 10 \mu m$

### CONFRONTO delle PROPRIETA'

~~DENSITA'~~ DENSITA'  $g/cm^3$

PE (0,97) < ARAMIDICHE (1,4) < C (1,8) < VETRO (2,5)  $\approx$  SiC, B <  $Al_2O_3$  (3,9)

MODULO ELASTICO GPa

vetro (70) < ARAM, PE (150) < SiC,  $Al_2O_3$  (400) < B (400) < C (900)

RES. A TRAZIONE

$Al_2O_3$  (1500 MPa) << C-HS (5500 MPa)

C,  $Al_2O_3$ , SiC, B  $\rightarrow$  fragili

Vetro  $\rightarrow$  ~~fragile~~ sezione piccola = poca probabilità di avere difetti (WEIBULL)

ARAMIDICHE, PE  $\rightarrow$  tenaci

~~risposta del docente~~

**matrice allo stato solido** metallurgia delle polveri



Temp. < della formatura in fase liquida ⇒ **MENO REATTIVITA'**

**Diffusion Bonding**

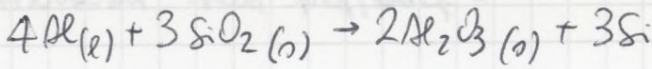
MONOSTRATO DI FIBRE E MATRICE → IMPIGILLO → HIP → Ti-6Al-4V/SCF

⚠ Alte performance → ALTI COSTI DI PRODUZIONE

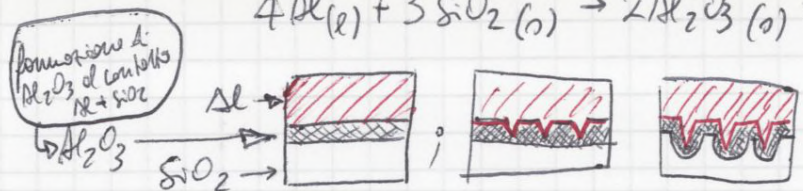
**Processi in situ** uniformemente prodotti con reatt. chimica de precursori

- processi gas-liquidi (DITOX: direct metal oxidation)
  - $3 O_{2(g)} + 4 Al_{(l)} \rightarrow 2 Al_2O_{3(s)} \rightarrow Al/Al_2O_3$
  - $CH_4(g) + [Al-Ti]_{(l)} \rightarrow Al_{(l)} + TiC_{(s)} + 2H_{2(g)} \rightarrow Al/TiC$

processi liquido-solido (INFILTRAZIONE REATTIVA)



(ciclo nell'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> infiltrazione di Al muove interfaccia Al/SiO<sub>2</sub>)



lo strato di Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> cresce

**Per Deposizione** spray di metallo fuso su un substrato di fibre (opero il ~~multistrato~~ / laminato e' da consolidare)

↓ RISCALDAMENTO, RULLI LAMINATORI

- PVD evaporazione de target, infiltrat. preforma, condensazione del solido
- CVD precursori gassosi, infiltrazione, reazione e ~~deposizione~~ prodotti solidi
- Elettrolitica galvanica di una preforma

# 13 - COMPOSITI PRC TECNOLOGIA

termosindurenti reticolati, lg. covalenti tra catene polimeriche

termoplastici lg. Van der Waals tra catene

RINFORZO fibre lunghe/corte → rinforzanti

particelle → rinforzo / filler / filler funzionale

⊖ COSTO  
particelle grossolane → colore, cond. elettrica, assorbimento UV, prop. magnetica  
⊖ cond. termica, effetto barriera

PRODUZIONE metodi manuali / semi-manuali.

1) prepreg

(con agente reticolante)

2) consolidamento matrice

reticolati per termosind (calore, energia UV)  
raffreddam. per termoplastici.

3) rimozione dello stampo

4) finitura

Metodi MANUALI

→ HAND LAY-UP



(⊖ costo  
⊕ pericolo per operatore)

SEMI-MANUALI

→ SPRAY LAY-UP

→ pistola che spruzza fibre lunghe preimbevute e resina

RTM (Resin Transfer Molding)

preferisce nello stampo

chiusura dello stampo

resina nello stampo (in pressione o in vuoto)

scaldo per reticolare / raffreddamento per solidificare

PR5-PR56n

pagli di fibre + matrice polimerica

alte prop. fibre (% fibre alte)

stoccaggio in freezer → evitare reticolazione indesiderata

SACCO-VUOTO-AUTOCLAVE

temperatura + pressione + vuoto

⊖ pesante, buona bagn. fibre, sicurezza operatore, ⊕ costi

# 14 - COMPOSITI PMC MATRICI

Matrice polimerica

TERMOINDURENTI

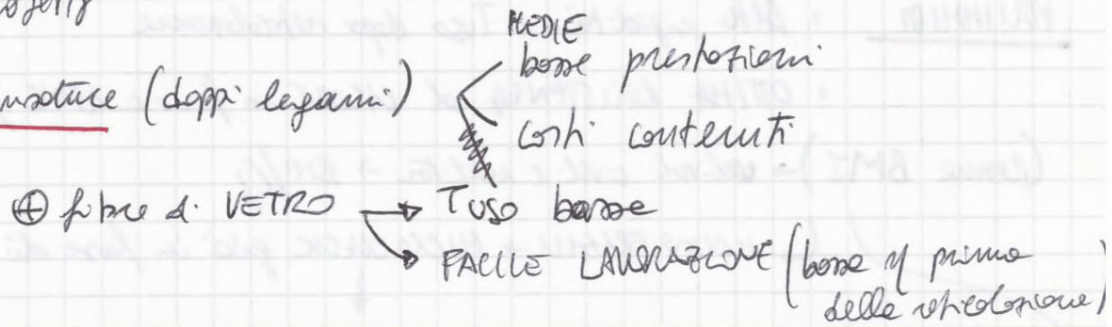
TERMOPLASTICHE

- \* epoxy (EP)
- \* POLIESTERE
- \* Fenolice
- \* PI

- \* NYLON (PA)
- \* PP
- \* PET, PBT
- \* PC
- \* PAN, PMMA
- \* PTFE
- \* PEEK
- \* PPS
- \* PI termoplastico

~~poliesteri~~ Termoset

Resine poliesteri insature (doppi legami)



SVANTAGGI

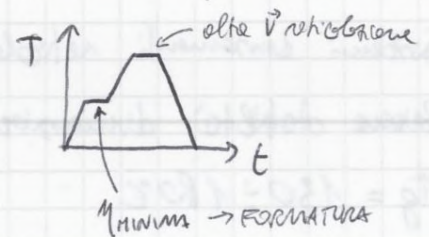
- Buona resistenza ad agenti aggressivi
- Assorbono umidità
- $T_g = 80 \div 150^\circ C \rightarrow$  Tuso MINORI
- Ritiro volumico in indurimento

(Pochi appl. aerospaz.)

(~~non~~ lavorabili delle poliesteri)

Resine Epossidiche (EP)  $T_g = 160 \div 260^\circ C$

- ottime capacità adesive con metalli, ceramici e polimeri
- buone di prima di reticolazione  $\rightarrow$  BUONA IMPREGNAZ. FIBRE
- laminati compositi di alta qualità
- stoccaggio adeguato per evitare reticolazione precoce
- inerzia chimica, buone prop. meccaniche



COMPOSITI EPOXY / CARBONIO FIBRE  $\rightarrow$  componenti delle leghe di Al pu componenti aeronautiche

Assorbimento di umidità in presenza di fibre di vetro  $\rightarrow$  effetti critici

Termoplastici → POSSIBILITA' DI GIUNTALE pu fusione, saldatura, incollaggio e giunzione meccanica

## POLICARBONATO (PC)

→ CANOPY (cupolini) aereo



- Resistenza all'urto
- Amorpho
- $T_g = 150^\circ\text{C}$
- Stabilità → dimensionale  
↳ age: UV
- lavorabilità

## Polietero etere chetone (PEEK)

$T_g = 143^\circ\text{C}$

$T_{fm} = 373^\circ\text{C}$

- Buone prop meccan fino a  $230^\circ\text{C}$ , stabilità termica e dimensionale
- TENACITA' ELEVATA  $K_{Ic} = 6 \text{ MJ/m}^2$
- Res. corrosione, abrasione
- Alte prop tribologiche
- Auto-lubrificante
- Ottime prop fisiche e dielettriche
- Lungo ~~life~~ ciclo di vita in esercizio

PEEK/GRAFITE → componenti velivoli

## POLIPENILEN SOLFURO (PPS)

rimane di colore PPS/Cg

- Res. alto T
- Res. creep
- Alto Modulo
- Inerte Chimico



# ASHBY ASHBY TEORIA

Selezione dei materiali → 2 stadi

Analisi del progetto, criteri di selezione  
Criteri applicati (in dipendenza di proprietà)

Funzione primaria del componente →  $\rho$

Obiettivo → caratteristica più importante (strutturale ed anche estetica)

Vincoli → requisiti progettuali da soddisfare ( $\sigma_y, M, T, P, T_{max}, K_{30}$ )

Indici di prestazione

- 1- Equazione per l'obiettivo
- 2- eliminare variabili libere utilizzando i vincoli
- 3- Performance Index, raggruppamento delle prop. che consentono di raggiungere l'obiettivo
- 4- Grafici

Indici per la selezione (3 parametri)

$P$  → requisiti funzionali

$G$  → geometria

$M$  → prop del materiale (incluso il costo)

$$P = f[(P \cdot G \cdot M)]$$

variabili separabili

$$P = f_1(P) \cdot f_2(G) \cdot f_3(M)$$

Grafici di selezione dei materiali

anni: una (o una combinazione) di proprietà → applica nel grafico

Leghe leggere, Al-Mg, TBC

leghe di ALLUMINIO

Bone densità  
Resist. corrosione ed ossidazione  
Res. meccanica  
Non temer  
Buone prop. elettriche

BASSO COSTO

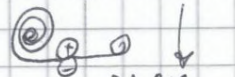
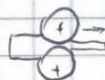
produzione → PROCESSO BAYER, processo elettrolitico per purificare l'Al (?)

colate continue (bille), roll casting e def. plastica (prodotti piani)  
(Semi-continua)

Al FUSO

→ CASTING → SCALPING → HOMOGENIZATION → HOT ROLLING → COILING → COLD ROLLING

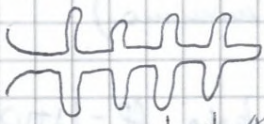
for. meccaniche con utensili



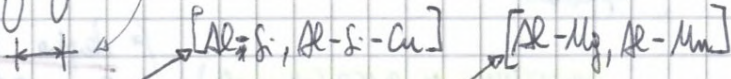
BACK ANNEALING

• **Microstruttura dei fetti raffreddati in conchiglia**

BENARDI → SDAS (secondary dendrite arm spacing) =  $K \cdot t_0^{1/3}$



↑ costante del metallo  
↓ tempo di solidif.



• Leghe per fetti / da invecchiamento / da trattamento termico

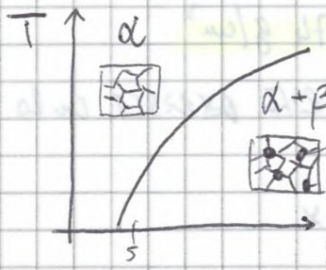
da def. pratica

- 1 XXX Al commercialmente puro
- 2 XXX Al-Cu
- 3 XXX Al-Mn
- 4 XXX Al-Si
- 5 XXX Al-Mg
- 6 XXX Al-Mg-Si
- 7 XXX Al-Zn-Mg
- 8 XXX altre composizioni

- Al-Cu
- Al-Cu-Mg
- Al-Mg-Si
- Al-Zn-Mg
- Al-Zn-Mg-Cu

(pag 11/09 - leghe Al-Mg)

• **Meccanismi di rafforzamento** → soluz. solida (precipitati / invecchiamento)  
res. a trax → 100 ÷ 600 MPa



precipitati di nuova fase, formati da atomi di altri elem. in dispersione omogenea oltre il limite di solubilità

• **Soluz. solida** → distorsione del reticolo da parte di atomi con raggi atomici diversi rispetto agli atomi del metallo base  
→ OSTACOLO allo scorrimento delle dislocazioni

• **Precipitati** { leghe con elem. di basso ⊕ solubilità in Al ed ⊕ Temperatura  
Solubilità ad alta temp. (S.S. OMOGENEA)  
Temperie in acqua @ T<sub>amb</sub> (S.S. SOVRASATURA)  
Decomposizione controllata → precipitati submicroscopici f. momento di spezz.

**STEPS**

PROCESSO DI INVECCHIAMENTO:

1. forma di aggregati di soluto (ZONE DI GUINIER-PRYSTON)
2. forma di precipitati di transizione parzialmente coerenti con la matrice
3. forma di prec. di equilibrio (ad iper-invecchiamento)

**RAPPREZZAMENTO** → dovuto alla interazione tra dislocazioni e coppia di tensioni delle zone di G-P.

ostacolo allo scorrim. delle dislocazioni da parte di precipitati par. incoerenti

Impurezze di Fe, Cu, Ni  $\rightarrow$  sono i catalodi se è presente un mezzo conduttore (microscopica galvanica)  $\leftarrow$

AUTOMOTIVE  $\rightarrow$   $\oplus$  Mg  $\rightarrow$   $\ominus$  peso  $\rightarrow$   $\ominus$  consumo ed emissioni

$\rightarrow$  tabelle prop. delle leghe di Al, Mg

## NANOMAT 1 ~~XXX~~

Almeno una dimensione  $\leq 100$  nm

nanopolveri  $\rightarrow$  diam.  $\approx 100$  nm

dot. monocristallini  $\rightarrow$  spessore del grano  $< 100$  nm

Motori ULTRA-DISPERSO  
NANO POLVERI ~~XXX~~

Alto rapporto specifico  $\rho = S/V \rightarrow$  alto numero di atomi di superficie rispetto agli atomi di Bulk

stato di non-equilibrio della materia condensata

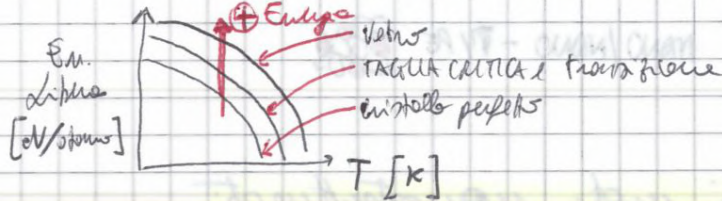
Bordi di Grano  $\rightarrow$  ruolo fondamentale nella diff. plastica, nei mecc. lungo: BtG, diffusione, rottura

CRISTALLI (elem. nanometrici)  $\rightarrow$  assemblaggio ~~XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX~~

Energia libera Elevata

BtG

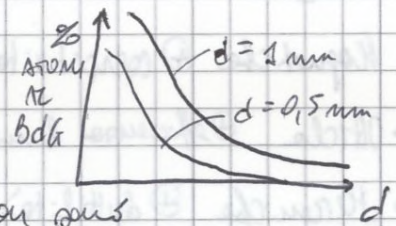
transizione di fase da stato monocristallino a VETROSO sotto una tensione critica del grano



Atomi ai BtG  $\rightarrow$  anche  $> 49\%$  !

grani come sfere  $\rightarrow$  FRAZIONI IN VOLUME DI INTERFACCIE  $\approx 3 \frac{D}{d}$   $\leftarrow$  dens. media grano  $\leftarrow$  spesso media interfaccia

Se  $D = 1$  mm  $\rightarrow$  Fra. Vol = 50% con  $d = 5$  mm  
30% con  $d = 10$  mm  
3% con  $d = 100$  mm



Metastabilità  $\rightarrow$  le strutture o fasi preferenziali di crescita non sono necessariamente la più stabile.

Struttura di BtG (?) ~~XXXX~~ non si vede un ordine a lungo o corto raggio  
Atomi del BtG  $\rightarrow$  disordine elevato

Soluzioni Solide  $\rightarrow$  atomi di soluto preferenzialmente segregano ai BtG

Sfrutto una variazione della solubilità per formare S.S. non altrimenti ottenibili (es: Ag-Fe)

• Not monocristallini derivanti da cristallizzazione di Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, facilmente verificabile attraverso prove meccaniche (?)

• Solubilità @ stato solido

miscibilità del soluto A (controllata dal pot. chimico  $\mu_A$ ) nel solvente B. Se la struttura atomica di B cambia, ~~cap~~ cambia  $\mu_B$  e la solubilità di A in B

Solubilità del C nel Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> @  $T_{Fe_2O_3}$ 

- 900% in massa in met. e gran. porosi
- 2% nel met. monostutturato

• Diffusività maggiore nei NSM

• Capacità Termica  $\rightarrow$  NSM  $\rightarrow$   $\oplus$  disordine (BdG)  $\rightarrow$   $\oplus$  Cap. termica  
 (Cp NSM > Cp met. tridimensionale)  $\rightarrow$   $\oplus$  ENTROPIA

• Densità (regole delle miscele)  $\rho = f_{BdG} \rho_{BdG} + f_g \rho_{gran}$   $\rho_{BdG} < \rho_g$  (~4%)

• Espansione Termica
 

- o molti BdG  $\rightarrow$  ~~maggiore~~ maggiore dilatazione termica rispetto al monocristallo
- o CTE met. massivi ~~no~~  $>$  CTE monocristall. Nanocristallini

$\alpha = f_i \alpha_i + f_c \alpha_c$   
 (CTE)  $\uparrow$   $\leftarrow$  interfaccia  $\rightarrow$  cristalliti

$\alpha = f_{BdG} \alpha_{BdG} + f_g \alpha_g$   
 gran.

$\ominus$  topia del grano  $\rightarrow$   $(\alpha_i - \alpha_c)$  diminuisce

• Condensazione simile al met. non monostutturato, ~~al~~ stabilizzatori  
MA il NSM sembra essere più suscettibile al deposito condizionale

• PROPRIETÀ MECCANICHE

• Def. elastico (reversibile) allungamento (BAND) e strisciamento (STRETCH) del legame fra atomi

• Def. plastico  $\rightarrow$  moto dislocativo, vettore di Burgers (irreversibile)

- conservativo (GLID) muta creazione/annullamento di difetti (es: vacanze)
- NON-CONSERVATIVO (CLIMB) diffusione termica, difetti

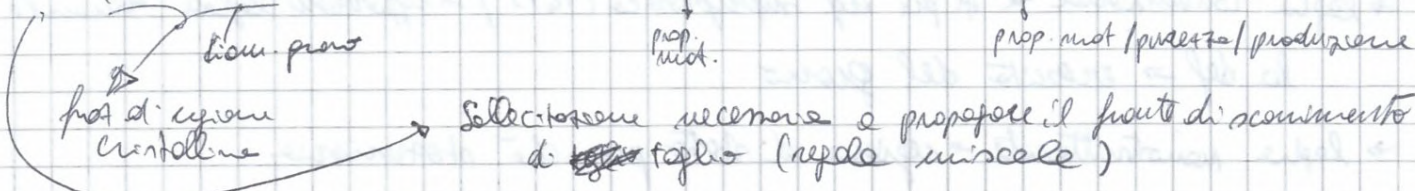
scambi viscosi (CREEP)  $\rightarrow$  tempo e temperatura

Def. plastico a freddo ( $T = 0,3 \cdot T_f$  in Kelvin)

Vibrio creep  $\rightarrow$  funzione della topia del grano

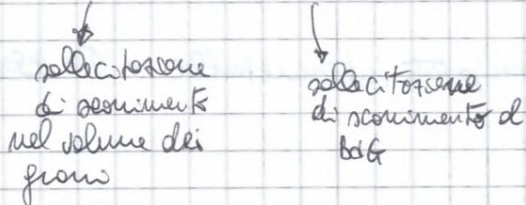
Nobino-Kleming  $\rightarrow d^{-2} \rightarrow$  diff. in volume // Ashby-Venell  $\rightarrow d^{-3} \rightarrow$  diff @ interfacce

$$\sigma = (1 - \Delta t/d) \sigma_c + (\Delta t/d) \sigma_b = \sigma_c - (\Delta t/d) (\sigma_c - \sigma_b)$$



Modello della nanostruttura come struttura composita -  
 Limite elastico

$$\sigma_y = \sigma_{FG} + 8K (\sigma_{fGB} - \sigma_{FG}) d^{-1/2} - 16K^2 (\sigma_{fGB} - \sigma_{FG}) d^{-1}$$



Taglio micrometrico dei grani → prevale  $d^{-1/2}$  → Hall-Petch →  $K = 8K (\sigma_{fGB} - \sigma_{FG})$

Θ taglio → cresce contributo di  $d^{-1}$

## NANO MAT 2

↳ Rivestimenti  
 NSM polimerici

Applicazioni di nanomateriali → transistor, optoe: NSM leggeri, resistenti

→ produzione di particelle nanosforiche, metodi:

### • ALLO STATO SOLIDO

digestione mercurio  
 sintesi mercuriochimica  
 meccanica

### • IN FASE GAS

pirolisi in fiamma  
 ablazione laser  
 sintesi in plasma con RF e MW  
 plasma spray

### • METODI CHIMICI

sol. gel  
 chimica colloidale  
 sintesi idrotermica  
 a vapore  
 o elettrolitica  
 elettrodeposizione  
 sonochimica  
 centrifugazione

### • IN FASE VAPORE

PVD, CVD, PECVD

• Severe Plastic Deformation → interst. significativa, ⊕ prop. meccaniche  
 ⊕ No. mecc.

• Au - NSM → contro estivi edri

• TURBINE di aereo (Al)

⊕ Leghe Nanocristalline a base ALUMINIO → ~~Al-Cu~~, Al-Ni-Mg (Me = Co, Y)

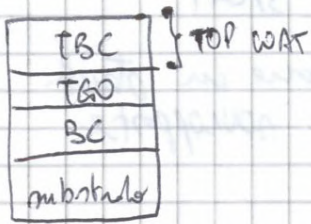
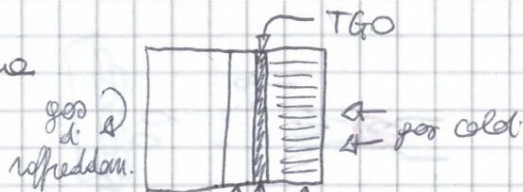
(→ alternative alle leghe due fasi)

Sol. Solida a base Al nelle quale sono disperse fin. particelle di 2° fase (Al<sub>3</sub>Ni, Al<sub>11</sub>(CoCe)<sub>3</sub>)

fin. grani: EQ, taglia = 100 - 200nm (Al CFC) e taglia 50nm per pl. intermetallici

⊕ Res Mecc (anche in temp), ⊖ CTE, ⊕ Res. usura

• Poletta di turbina, sezione



Supuleghe di NICKEL (STRUCTURALS)

BOND COAT

TGO

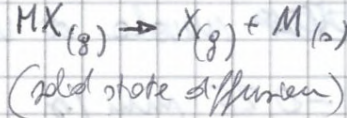
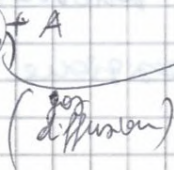
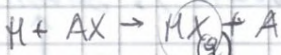
$ZrO_2$  stabilizzato  $Y_2O_3$  (TOP COAT)

$TGO \rightarrow Al_2O_3$ , adesiv al Bond Coat

$Al \rightarrow$  OSSIDATO  $\rightarrow Al_2O_3$   
uniforme: CTE

Thermally grown Oxide (?)

• BOND COAT illuminazione + processo POWDER PACK



(polveri nere nelle impuleghe, colore)

• Sistemi OVERLAY

$M_2 A IX$

(Ni, Co, Fe)

(Y, Hf, Si, Ta, Zr)

independent del substrato  
realizzati in base alle applicazioni

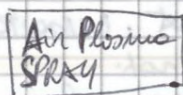
- EB-PVD (electron beam PVD)
- Thermal Spray

posso rivestire SOLO imp. o VISTA

• TOP-COAT

TBC depositati con EB-PVD

alte strain tolerance  
alte cond. termiche



APS

Bone cond. term.  
Bone strain tolerance

• Danneggiamento del TBC

ossidazione del Bond Coat

$T_{MAX} = 1200^\circ C$

THF  
Effetti dello ossidazione  
 $\Delta CTE$   
Morfologia interfacia BC/TGO  
Instabilità microstrutt. @ alte temp.

• TIPOLOGIE

TBC da EB PVD  $\rightarrow$  pale rotative (resistenza a fatica termomeccanica)

TBC da APS  $\rightarrow$  prestazioni inferiori e costo inferiori  $\rightarrow$  componenti del compressore  
 $\rightarrow$  pale statoriche e pale rotative turbogaz

TBC  $\rightarrow$  PROLOGO  $\rightarrow$  non protegge da ossidazione e corrosione  
 $\rightarrow$  protezione dal calore

• PROCESSO APS, AIR PLASMA SPRAY (THERMAL SPRAY)

FILIPPO  $\rightarrow$  particelle fuse / omogenee depositate su substrato mediante flusso di gas

• COMBUSTIONE  $\rightarrow$  PLASMA SPRAY  
STATIONARY HIGH VELOCITY OXYGEN FUEL

• ARCO ELETTRICO  $\rightarrow$  IN ACQUA (APS)  
SOLO VUOTO (VPS)  
WIRE-ARC SPRAY

## • Sistemi APS

trattamenti in isotermia



⊕ spessore TGO  
nuclea cicche tra TGO e TC  
cicche comuni nel TC  
reticolo di cicche sotto al TC  
separa. microscopica nel TC (apertura cicche)  
convergenza interfacce  
cicche nel TC ⊥ alla mp  
rotture all'interfaccia BC-TGO

## • Accrescimento e geometria ~~del TGO~~

crescita del TGO → variazione morfologia, deformazione

$$\frac{\Delta V_{\text{ossido prodotto}}}{\Delta V_{\text{metallo consumato}} \rightarrow \text{Pilling-Bedworth} \rightarrow E_{gr} = 0,3 \rightarrow \text{tensioni elevate}$$

## • Simulazione della crescita del TGO (2D e 3D)

# MATERIALI UTILIZZATI IN CAMPO AEROSPAZIALE:

\* SUPERLEGHE BASE NICHEL

\* " BASE NICHEL-FERRO

\* " BASE COBALTO

\* MATERIALI INTERMETALLICI → Vantaggi: \* BASSA DENSITA' \* ALTE  $T_{fus}$

\* NOTEVOLE RIGIDITA'

\* BUONA RESISTENZA ALL'OSSIDAZIONE

→ Svantaggi:

\* BASSA DUTILITA' A AMBIENTE

\* SCARSA TENACITA' A FRATTURA

\* ELEVATA VELOCITA' DI PROPAGAZIONE DELLA FRATTURA A FATICA

→ NiAl

→ Ni<sub>3</sub>Al

→ TiAl ( $\gamma$ )

→ Ti<sub>3</sub>Al ( $\alpha_2$ )

} due fasi presenti in un unico intermetallico bifasico di grande interesse tecnologico.

\* ACCIAI

\* LEGHE DI Ti → leghe  $\alpha$

→ leghe  $\beta$

→ leghe  $\alpha + \beta$

\* TITANIO COMMERCIALMENTE PURO



## \* STEP PROCESSI PRODUTTIVI SUPERLEGHE ODS:

- 1) Miscelazione, frantumazione, omogeneizzazione delle polveri
- 2) Compattazione delle polveri
- 3) Sinterizzazione
- 4) Lavorazione per deformazione plastica
- 5) Ricristallizzazione.

## \* POSSIBILI AZIONI DEGLI ALLIGANTI NELLE SUPERLEGHE NICHEL-COBALTO

- Entrare in soluzione solida ( $\gamma$ )
- Formare composti intermetallici-indurenti ( $\gamma'$ )
- Formare carburi
- Stabilizzatore  $\delta$
- Formare ossidi superficiali con funzione protettiva

## \* MECCANISMI DI RAFFORZAMENTO SUPERLEGHE

- PER SOLUZIONE SOLIDA
- PER PRECIPITAZIONE DI SECONDE FASI
- PER FORMAZIONE DI CARBURI

## \* FASI INDESIDERATE NELLE SUPERLEGHE (TCP)

- FASI  $\sigma$
- FASI  $\mu$
- FASI DI LAVES

## \* PROCESSI DA DEFORMAZIONE PLASTICA NELLE SUPERLEGHE

- \* Laminazione
- \* Forgiatura
- \* Estrusione
- \* Ring rolling

## \* CARATTERISTICHE LEGHE $\beta$ (leghe di $Ti$ )

- \* Non solubili o a solubilità limitata
- \* Non adatte per impieghi ad alte  $T$
- \* Rafforzabili <sup>anche</sup> mediante  $T T$
- \* Struttura CCC
- \* Ottima formabilità
- \* Durezza limitata rispetto agli acciai
- \* Migliori prop. meccaniche rispetto agli acciai

## \* CARATTERISTICHE LEGHE $\alpha + \beta$ (leghe di $Ti$ )

- \* Buona solubilità per bassi tenori di  $\beta$  stabilizzanti.
- \* elevate prop. meccaniche fino a  $\sim 400^\circ C$
- \* Buona formabilità

## \* METODI DI LAVORAZIONE DELLE LEGHE DI $Ti$

- COLATA (casting)
- DEFORMAZIONE PLASTICA
- METALLURGIA DELLE POLVERI (HIP)
- ADDITIVE MANUFACTURING

\* DIFFUSION BONDING: Tecnica di saldatura per diffusione che sfrutta la diffusione allo stato solido per realizzare la saldatura tra due componenti, senza portare le superfici da saldare ad incipiente fusione e senza l'apporto di un terzo materiale fondente che solidificando tenga uniti i due pezzi da saldare.

## \* STEPS DEL PROCESSO DI DIFFUSION BONDING:

- 1) Contatto tra le due superfici da saldare e applicazione di pressione +  $T$
- 2) Formazione di colli e crescita per diffusione
- 3) Formazione di un legame stabile.

## DOMANDE D'ESAME MATERIALI PER L'AEROSPAZIO

- **Compito 25/06/2014; fila A**

- 1) Quali sono i possibili meccanismi di azione (ruoli) degli elementi alliganti in una superlega di nichel?
- 2) Che cosa sono le superleghe ODS e con quale altro tipo di superleghe sono in competizione?
- 3) Quali sono le microstrutture possibili nelle leghe della gamma Ti-Al e quale si sceglierà volendo massimizzare la resistenza al creep?
- 4) Cos'è il fenomeno della sensibilizzazione degli acciai e in quale tipo di acciai può manifestarsi?
- 5) Su cosa si basa la differenza tra leghe di titanio alfa e leghe di titanio beta e come è possibile realizzare le une piuttosto che le altre a partire dal Ti? Quale dei due tipi sceglierò per un componente che debba lavorare alle alte temperature?
- 6) Classificazione delle tecnologie di additive: come si differenziano le diverse tipologie di additive manufacturing che conoscete?
- 7) Descrivere il principio e la meccanica di funzionamento dei processi di fresatura elettrochimica.
- 8) Quali (uno o più di uno) tra i seguenti abbinamenti tra rinforzante e matrice NON sono adottati nella fabbricazione di materiali compositi?
  - a) matrice polimerica/fibre kevlar
  - b) matrice polimerica/fibre di SiC
  - c) matrice di titanio/fibre di SiC
  - d) matrice di titanio/fibre di kevlar
  - e) matrice di Al/particelle di SiC
  - f) matrice di Al/fibre di allumina

## • Compito di esempio fornito dai docenti

- 1) Quali sono i possibili meccanismi di azione (ruoli) degli elementi alliganti in una superlega di nichel?
- 2) Evoluzione delle composizioni chimiche degli intermetallici di tipo  $\gamma$ -TiAl (generazioni successive)? E per quale componente sono pensate?
- 3) Normalizzazione degli acciai, in cosa consiste e a che scopo viene eseguita?
- 4) Diffusion bonding: di cosa si tratta e come avviene. Schematizzare ciò che succede a livello atomico
- 5) Descrivere il processo di fresatura chimica
- 6) Quali sono le diverse tipologie di fibre di vetro?
- 7) Descrivere il processo di poltrusione. Dire anche che materiali riguarda e che geometrie di componenti
- 8) Quali tipologie di rinforzanti si usano nei MMCs e a che classe di materiali possono appartenere
- 9) Descrivere quali sono le principali cause di danneggiamento delle TBC
- 10) Quali sono i materiali più idonei ad applicazioni in scudi termici riutilizzabili per i veicoli di rientro nelle zone più sollecitate termicamente. Quali le principali caratteristiche termomeccaniche?
- 11) Quale è l'architettura caratteristica di un TPS ablativo per bassi flussi termici in termini di materiali utilizzati?
- 12) Quale è la differenza che intercorre tra una risposta attiva ed una risposta passiva di un materiale intelligente?
- 13) Quale è il principio di funzionamento di una fibra ottica?

25/6/2014

1) Alligant: in supuleghe di Nichel

Soluzione solida ( $\delta$ )  $\rightarrow$  ostacolo al moto delle dislocazioni, rafforzamento (Al, W, Mo) composti intermetallici indurenti ( $\delta'$ )  $\rightarrow$  precipitati coerenti o no ( $Ni_3X$ ), HCPIT, tensioni formazioni di carboni e boroni  $\rightarrow$  che ostacolano il moto dislocativo stabilizzazione  $\beta$  del  $\alpha$   $\rightarrow$   $\beta$  del  $\alpha$  nei grani, ostacoli, stabilizz.  $\beta$  del  $\alpha$  ( $\ominus$  Creep) onde superficiali protettivi

2) supuleghe ODS: rinforzo AVENS per dispersione di ossidi (YTTBA in particolare)

res. e creep molto i  $1000^\circ C$   $\leftarrow$  supuleghe ~~ODS~~, per le ODS ~~ODS~~ migliorano ~~single crystal~~ MIGLIORA

3) microstrutture di  $\delta$ -TiAl

EQ ( $\delta$  near  $\delta$ )  $\rightarrow$  grani  $\alpha_2$  e  $\delta$  grani  $\delta$   
LAMINARE (Fully e near)  $\rightarrow$  lamelle  $\alpha_2$  e lamelle  $\delta$   
DUPLEX  $\rightarrow$  ~~intermedio~~ intermedio tra EQ e PL  $\rightarrow$  compromesso  
res. creep migliore  $\rightarrow$  LAMINARE  
res. fratt. e duttilità  $\rightarrow$  EQUIASSICA (NEAR  $\delta$ )

4) Sensibilizzazione degli acciai  $\rightarrow$  negli INOX ( $Cr \geq 12\%$ )  $\rightarrow$  formazione di carboni di cromo, consumo del cromo fino a sotto il 12% e perdita dell' "immortalità", dello strato passivante, notevole riduzione di res. e corrosione/ossidazione.

da combattere con  $\rightarrow$   $\ominus C$ , aggiunta di Ti, Nb, Te  $\rightarrow$  format. di carboni al posto del cromo  
 $\rightarrow T_{uso} < 370^\circ C$

5) leghe di Ti  $\alpha$  e  $\beta$ , produzione ~~leghe~~ e caratteristiche

leghe  $\alpha$   $\rightarrow$  EC  $\rightarrow$   $\oplus$  Res. al creep

$\rightarrow$  aggiunta di  $\alpha$ -stabilizzanti  $\rightarrow$  Al, N, O, C

leghe  $\beta$   $\rightarrow$  CCC  $\rightarrow$   $\oplus$  duttilità

$\rightarrow$  aggiunta di  $\beta$ -stabilizzanti  $\rightarrow$  V, Mo, Nb, Te

} differente nel # di sistemi di scorrimento

6) Additive manufacturing

Metodo di potenza (polveri <sup>met.</sup> letto/iniettate, fibre metalliche, laminae met.) e fonte energetica (fascio elettronico, laser, ultrasuoni). ~~Fusione delle polveri EBM, SLS~~

EBM, SLS, SLM letto di polveri fuso e sinterizzato; polveri iniettate LENS; filo LMD; laminae <sup>LOM</sup> UC

7) Fratture elettrolitiche: fumo di bp. elettrolitico, utenze calde, petto ondata, ~~per~~ NO oss. elettrolitico, processo interno della placchetta galvanica

8) Compositi  $\rightarrow$  NON  $\rightarrow$  formare gli abbinamenti  $\rightarrow$  POLIMERI / G.C. fibre

$\rightarrow$  BORO con COATING per matrici Al, Ti, Mg  
 $\rightarrow$  TITANIO / Kevlar fibre  
 $\rightarrow$  fibre VETRO  $\rightarrow$  solo matrici polimeriche

### 13) PIEZOELETTRICI

2

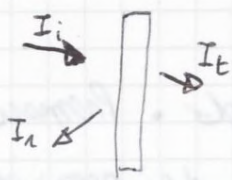
sensori → effetto piezoelett. DIRETTO → da deformazioni def. mecc e forniscono un segnale elett.

funzionamento: la def. mecc. provoca ~~la~~ variazione delle distanze tra gli atomi della cella cristallina, con la conseguente variazione del dipolo elettrico

→ mat. piezoelett. artif. od. → vanno polarizzati

effetto inverso → input elettrico e output meccanico (attuatore), i dipoli si modificano in base al campo elettrico esterno, c'è uno spostamento degli atomi nelle ~~cella~~ celle cristalline e una deformazione a livello macroscopico

### 14) Vetri e Roduzione



$\alpha + \tau + \rho = 1$ , coefficienti di assorbimento, trasmissione, riflessione  
 di ~~tra~~ incidenti può avere anche, trasmissione o riflessione. Si stima che solo  $\frac{1}{3}$  della  $I_{inc}$  venga riflessa, quindi la

riduzione complessivamente trasmessa dal vetro solo

Energia trasmessa nel locale =  $I (\tau + 0,33\alpha)$ , con  $\tau + 0,33\alpha = PS$  (Fattore solido)

### 15) Nanostruttura ed esp. termica → tanti Bdt → ~~meno~~ <sup>TANTA</sup> esp. termica rispetto al monocristallo

$$\alpha = \alpha_{Bdt} + \alpha_{grani/grano}$$

con  $\theta$  foglio di grani si ha  $\oplus$  ~~alla~~ dilatazione termica, ~~la~~ ~~esp.~~ <sup>esp.</sup> ~~è~~ <sup>è</sup> legato all'aumento in volume dei Bdt, dove sono presenti atomi più lontani tra loro rispetto a quelli contenuti nei grani.

### 16) Rafforzamento legge di Al

• precipitazione 2a fase → ostacolo al moto delle dislocazioni, possono essere

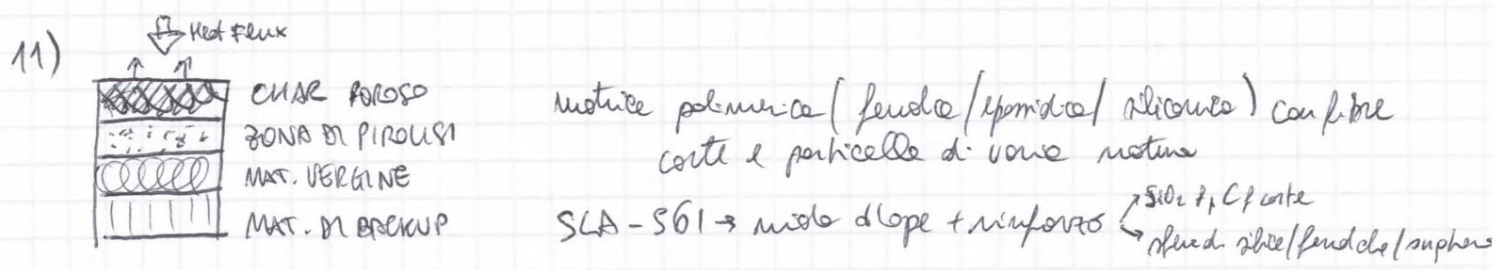
vincoli o incoerenti, c'è un MISFIT ~~del~~ e il reticolo si distorce, stato termicamente che blocca le dislocazioni, porta ad alta temp una lega con molti elem. disciolti (sol. solida omogenea), tempera (sol. solida sovrasatura), invece può avere decomposizione della SS ed ottenere precip. fini e ben dispersi (GUINIER-PRYSTON). Non deve sotto/sovra-inverchiare.

• Per Soluzione Solida si ha un elemento differente da quella base, che si inserisce nel reticolo → distorsione → tensionamento → priming delle dislocazioni (differenza tra raggi atomici)

2

RIC

10) ~~FRSI~~ Shuttle → fluminarie maggiori nel nose e profil. elev., vengono realizzati TPS composto di RCC come strato esterno (in piastrelle) sostenute da un isolante (FRSI) ~~che è~~ una struttura in alluminio  
 $T > 1250^{\circ}\text{C}$ , basso peso, profil. aerodinamica, lo T si mantene internamente a 600 Mpa per via dell'aumentare delle T / ~~piastrelle~~ (fino a circa  $2000^{\circ}\text{C}$ )



12) SMART MAT. ~~che~~ Risposta → ATTIVA → da un input, l'output sarà una variazione di forma/dimensione  
 ↳ PASSIVA → output → variazione di proprietà

13) trasmissione fotonica dei segnali (~~che è~~ differente da quella elettronica nei fili metallici), così che avviene per mezzo di fotoni di una radiaz. elettromagn. o di luce. Il nucleo delle fibre guida la radiazione, la totale riflessione interna è garantita dal mantello (che ha diverso indice di rifrazione rispetto al nucleo). Il tutto è protetto da un rivestimento, per evitare danneggiamenti. ~~Sotto forma~~  
 Silice ~~che è~~ di elevato purezza.

14) Nanostruttura e proprietà → densità →  $\rho = \rho_{\text{mat}} f_{\text{mat}} + \rho_f f_f$   
 $\rho_{\text{mat}} < \rho_f$  (~4%)  
 $\rho_{\text{mat TRADIZIONALE}} < \rho_{\text{mat. NANOSTRUTTURATO}}$

15) Leghe di Mg

Al, Zn, Zr, Th  
 Re, Ag, Y, Si, Li

per leghe <sup>Mg</sup> ~~con~~ Al → lo ZIRCONIO → affina il grano  
 → rimuove idrogeno (ZrH<sub>2</sub>)  
 → ⊕ res meccan con Zn, Re, Y

anche domus intermetalliche: ineficaci

leghe Mg-Al → grani α + precipitati β

16) Leghe Ti: -10V - 2Fe - 3Al → β  
 Ti - 5Al - 2,5 Sn → α  
 Ti - 6Al - 4V → α + β

18) Freno nelle impuleghe → COSTI

DB diffusion bonding  
SPF superplastic formation  
SCC stress-corrosion ~~and~~ cracking

LBW laser beam welding  
EBW electron beam welding  
PAW plasma arc welding  
GMAW gas metal arc welding  
MIG metal inert gas  
GTAW gas tungsten arc welding  
TIG tungsten inert gas  
FSW friction stir welding

Soldering

WJC water jet cutting  
AWJC abrasive water jet cutting  
USM ultrasonic machining  
ECM electro-chemical machining  
EDM electric discharge machining  
EDWC electric discharge wire cutting  
CHM chemical machining

Non-traditional

TPS thermal protection ~~shield~~ system  
RCC reinforced carbon-carbon  
HRSI high-temperature reusable surface insulation  
LRSI low-temperature " " "  
FRCI fibrous refractory composites insulation  
AFRSI advanced flexible reusable surface insulation  
SIP strain isolator pad  
FRSI felt reusable surface insulation  
LCA lightweight ceramic ablators  
SMA shape memory alloys = LMF

TPS

MR FLUIDS fluids magnets-rheology





# MECCANISMI DI RAFFORZAMENTO

→ SUPERLEGHE → per soluzioni solide  
→ per precipitazione di seconde fasi  
→ per formazione di carburi

→ ACCIAI → per soluzioni solide  
→ per precipitazione di seconde fasi  
→ per affinamento del grano  
→ per inclusions

→ LEGHE DI AL → per soluzioni solide  
→ per precipitazione di seconde fasi  
→ per inclusions

## STRUTTURA TBC

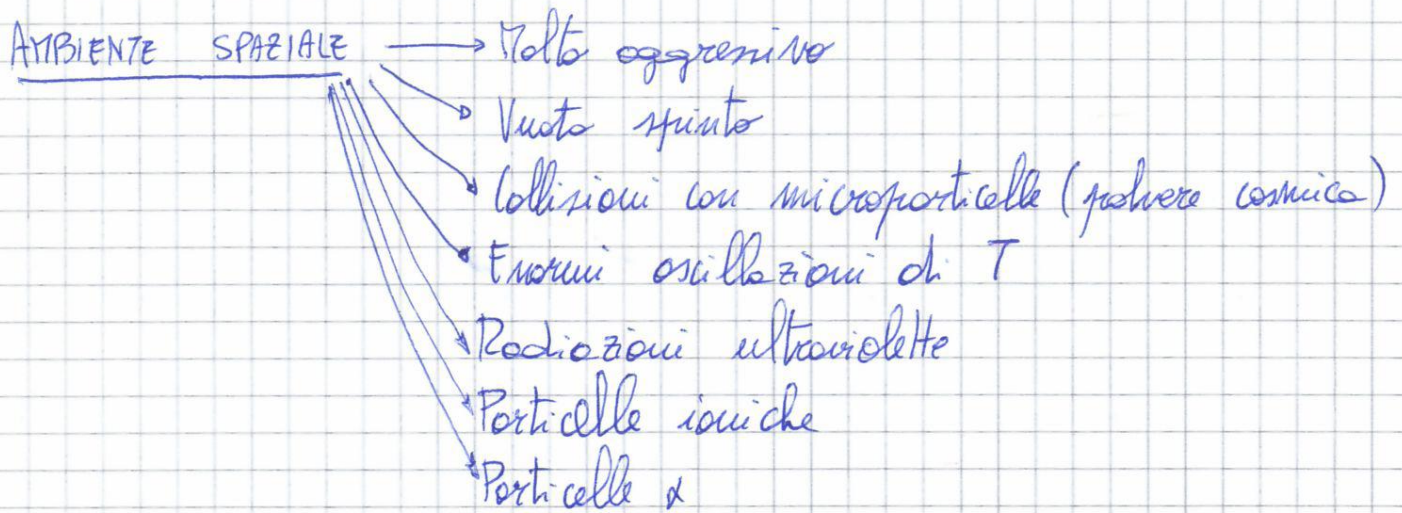
→ SUBSTRATO → Superlega a base nichel; Funzione strutturale

→ BOND COAT → Alto contenuto di Al; Protegge il substrato  
ossidandosi ad  $Al_2O_3$ ; Uniforma i coeff di espansione  
termica

→ TGO →  $Al_2O_3$ ; prodotto di ossidazione del BC; Sottile  
ed aderente al BC

→ TOP-COAT →  $ZrO_2$  stabilizzata con  $Y_2O_3$ ; buona  
conduttività termica.

## TPS thermal protection system



Per i SISTEMI DI PROTEZIONE TERMICA vengono utilizzati COMPOSITI CERAMICI, con target di durata di 100 missioni.

Range di T d'uso da  $-121$  a  $1650^{\circ}\text{C}$

Necessità di resistenza  $\rightarrow$  forze a cui è soggetta la struttura dovuta all'ambiente esterno.

ELEMENTI COSTITUTIVI I TPS  $\rightarrow$  **BLANKETS**:  $\alpha$  molto simili ai materiali utilizzati per la struttura.

$\downarrow$  **TILES**: piastrelle (costing) che irrigidisce la struttura rendendola più resistente ai carichi. Tipicamente a base di ossidi, buona conducibilità termica ( $\text{SiO}_2$  o  $\text{Al}_2\text{O}_3$  o combinazione dei due)